مهندسی متالورژی و مواد

https://jmme.um.ac.ir/

انجمن آهن و فولاد ایران



بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت لوله‌ای شکل زمینه آلومینیوم تقویت شده با الیاف کربن و شیشه *

مقاله پژوهشی

علی علیزاده[۱] شهاب پلویی[۲] محمدرضا زحمتکش[۳] مهدی عبدالهی آذغان[٤]

DOI: 10.22067/jmme.2023.77877.1066

چکیده *در این پژوهش، از آلیاژ آلومینیومی A۳٥٦ به‌عنوان زمینه و الیاف کربن T۳۰۰ و الیاف شیشه E-glass به‌عنوان تقویت‌کننده طی فرآیند ریخته‌گری کوبشی برای تولید کامپوزیت زمینه فلزی استفاده شد. بدین منظور ابتدا الیاف کربن، با استفاده از روش الکترولس، به‌وسیله‌ی لایه‌ای از نیکل – فسفر پوشش‌دهی گردید. سپس لوله‌ی آلیاژی آلومینیوم A۳٥٦ و لوله‌های کامپوزیتی با ۳۰ درصد وزنی الیاف کربن پوشش‌دهی شده و بدون پوشش و ۳۰، ٤۰، ٥۰ و ٦۰ درصد وزنی الیاف شیشه در فشار ۷٥ مگاپاسکال و دمای ٥۰۰ درجه سانتی‌گراد ریخته‌گری شدند و پس از فرآیند ریخته‌گری، ریزساختار نمونه‌های کامپوزیتی و خواص مکانیکی آن مورد بررسی قرار گرفتند. سختی لوله‌های کامپوزیتی با ٥۰ درصد وزنی الیاف شیشه حدوداً ۲ برابر لوله آلیاژی بود و چگالی با افزایش درصد وزنی الیاف تا ۹/٥ درصد کاهش پیدا کرد. بالاترین استحکام خمشی، Mpa ۳٤۰/۸۲ و مربوط به لوله‌ی کامپوزیتی تقویت‌شده با ٤۰ درصد وزنی الیاف شیشه بود. استحکام کششی لوله‌ی کامپوزیتی با ۳۰ درصد وزنی الیاف کربن که به روش آزمون نول اندازه‌گیری شد با افزایش ۷٦ درصدی نسبت به لوله آلیاژی، بیشترین استحکام کششی را داشت. مکانیزم غالب در شکست لوله‌ی کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف کربن، خروج الیاف و در شکست لوله‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف شیشه، برش الیاف بود.*

واژه‌های کلیدی الیاف کربن، الیاف شیشه، پوشش نیکل–فسفر، ریخته‌گری کوبشی، آزمون نول

Investigation on Microstructure and Mechanical Behavior of Carbon and Glass Reinforced Aluminum Composite Pipes

Ali Alizadeh Shahab Poloee Mohammad Reza Zahmatkesh Mehdi Abdollahi Azghan

Abstract *In this research, for the fabrication of metal composites, A356 aluminum alloy serves as the matrix, and T300 carbon fiber and E-glass serve as reinforcements, in a squeeze casting process. Carbon fibers were first coated with a layer of nickel-phosphorus using the electroless method. Then, aluminum alloy 356 pipe and composite pipes with 30 weight percent of carbon fibers and 30,40,50 and 60 weight percent of glass fibers were cast at 75 MPa and 500 °C. After casting, the microstructure, and mechanical properties of composite samples were investigated. Nickel-phosphorus coating on carbon fibers has a significant effect on the wettability of carbon fibers with aluminum melt and thus the penetration of aluminum melt into carbon fibers. The hardness of composite pipes reached approximately 2 times that of alloy pipe and the density decreased to 9.5% with increasing weight percent of fibers. The highest bending strength was obtained at 340.82 MPa, which is related to the reinforced composite pipe with 40 weight percent of glass fibers. Tensile strength was measured by the nol ring test, in which a composite tube with 30 weight percent of carbon fiber had the highest tensile strength with a 76% increase over the alloy pipe. The predominant mechanism in the failure of carbon fiber-reinforced composite pipe was fiber pull-out and in the failure of glass-fiber-reinforced composite pipes, the fibers were cut.*

Keywords Carbon fibers, Glass fibers, Nickel-phosphorus coating, Squeeze casting, Nol ring test

* تاریخ دریافت مقاله ۱٤۰۱/٥/۳ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۱/۱۰/۱۹ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: دانشیار، مهندسی مواد مرکب، دانشگاه مالک اشتر، تهران

Email: A_Alizadeh@mut.ac.ir.

(۲) فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مواد مرکب، دانشگاه مالک اشتر، تهران

(۳) فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مواد مرکب، دانشگاه مالک اشتر، تهران

(٤) دانشجوی دکتری، مهندسی مواد مرکب، دانشگاه مالک اشتر، تهران

مقدمه

در کامپوزیت‌های زمینه فلزی، گستره‌ی وسیعی از فلزات و آلیاژها مانند آلیاژهای آلومینیوم، تیتانیم، منیزیم، مس و نیکل مورد استفاده قرار می‌گیرند و در کاربردهایی که وزن، پارامتر بحرانی نباشد آلیاژها و فلزاتی مانند آهن، نیکل، مس، کبالت، نقره و روی به‌عنوان زمینه فلزی استفاده می‌شوند. در این میان یکی از متداول‌ترین کامپوزیت‌های زمینه فلزی، کامپوزیت‌های پایه آلومینیوم و آلیاژهای آن است. علت استفاده از آلیاژهای آلومینیوم چگالی کم، دمای ذوب نسبتاً پایین، استحکام ویژه بالا، شکل‌پذیری خوب و مقاومت به خوردگی مناسب عنوان‌شده است [1,2].

تقویت‌کننده‌های متداول شامل کاربیدها، نیتریدها، اکسیدها و برخی مواد خالص مانند گرافیت هستند. پارامترهای اصلی در تعیین اثربخشی تقویت‌کننده شکل، اندازه، توزیع و پیوند آن با زمینه در فصل مشترک است [3,4].

الیاف کربن به علت مزایایی همچون استحکام و مدول ویژه بالا، استحکام خستگی زیاد، ضریب انبساط حرارتی بسیار پایین، دانسیته پایین و هدایت حرارتی و الکتریکی بالا از کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف نظامی، هوافضا، ساختمانی، ورزشی و خودروسازی برخوردار هستند. تنها ایراد وارد بر این الیاف صرف‌نظر از مسئله زیست‌محیطی، مقاومت پایین آن‌ها در برابر ضربه و خمش است که این معایب از طریق استفاده‌ی آن‌ها به‌عنوان تقویت‌کننده در کامپوزیت‌ها به حداقل می‌رسد. به‌طورکلی تقویت‌کننده‌های الیاف پیوسته نسبت به تقویت‌کننده‌های ذره‌ای یا الیاف کوتاه، تأثیر بیشتری در بهبود خواص مکانیکی دارند [5,6].

برای ساخت کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی روش‌های مختلفی وجود دارد که می‌توان آن‌ها را به سه گروه کلی حالت جامد، مایع و گاز تقسیم‌بندی کرد. روش‌های حالت جامد برای حصول خواص مکانیکی بالا و کاربردهای ویژه مورد استفاده قرار می‌گیرند. بااین‌حال، کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی برای اکثر کاربردهای تجاری با فرایندهای حالت مایع تولید می‌شوند. روش‌های حالت مایع دارای مزایایی نسبت به روش حالت جامد هستند. به‌عنوان‌مثال تهیه فلز مذاب نسبت به تهیه پودر فلزات ارزان‌تر و حمل شمش آن آسان‌تر است. همچنین می‌توان قطعات کامپوزیتی را با شکل‌ها و اندازه‌های گوناگون با استفاده از روش‌های ریخته‌گری توسعه‌یافته برای فلزات غیر کامپوزیتی تولید کرد [7,8].

با اینکه کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی با الیاف پیوسته کربن، دارای استحکام و سفتی مخصوص بالا و همچنین پایداری ابعادی خوبی می‌باشند، اما ترشوندگی ضعیف و واکنش شیمیایی بین الیاف کربن و زمینه آلومینیومی، موانع بزرگی برای دست یافتن به خواص و کارایی بالای مورد انتظار از این کامپوزیت‌ها می‌باشند. آلومینیوم تنها در دماهای بالای $1000\ ^{\circ}C$ قادر به تر کردن الیاف کربن هست و این در حالی است که در دماهای بالاتر از $550\ ^{\circ}C$، آلومینیوم به‌سرعت با کربن واکنش داده و کاربید آلومینیوم با ترکیب Al_4C_3 تشکیل می‌دهد که این مسئله منجر به تجزیه الیاف کربن و افت خواص کامپوزیت می‌گردد؛ بنابراین خواص نهایی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی با الیاف پیوسته کربن، به‌شدت تحت تأثیر دما و زمان تماس بین الیاف تقویت‌کننده و مذاب آلومینیوم، در حین تولید کامپوزیت هست [9].

پیش‌گرم الیاف یکی از موارد مؤثر در خواص نهایی نمونه کامپوزیتی هست به‌طوری‌که استفاده از الیاف کربنی پیش‌گرم نشده موجب انجماد سریع مذاب زمینه می‌شود که مانع از ادامه فرآیند نفوذ مذاب به‌صورت پیوسته می‌گردد. فشار مورداستفاده برای فلزخورانی نیز از پارامترهایی است که به شدت بر خواص نهایی کامپوزیت تأثیرگذار هست. استفاده از فشار به‌منظور فلزخورانی یکی از راه‌های غلبه بر مشکل عدم ترشوندگی در کامپوزیت‌های آلومینیوم-کربن است، درصورتی‌که فشار مورداستفاده برای فلزخورانی پایین باشد، مذاب آلومینیوم تنها در بین دسته‌های اصلی الیاف نفوذ کرده و رشته‌های درون دسته ها به‌وسیله مذاب آغشته نمی‌گردند که همین مسئله باعث به وجود آمدن نقص و افت خواص کامپوزیت می‌گردد [10,11].

اوربلو و همکارانش [12] لوله کامپوزیتی با زمینه‌ی آلیاژی آلومینیوم $AlSi_{12}Mg$ و تقویت‌کننده کربنی را تولید و خواص خمشی و ریزساختاری آن را بررسی کردند. بیش‌ترین مقدار کربن در کف و کم‌ترین مقدار در بالا اندازه‌گیری شد. مشاهده شد افزایش درصد حجمی الیاف کربن افزایش استحکام خمشی لوله‌ی کامپوزیتی را به دنبال دارد.

سشان و همکاران [13] به بررسی کامپوزیت زمینه فلزی با تقویت کننده به شکل الیاف پرداختند. سختی آلیاژ پایه با افزودن الیاف از ۱۲۰ به ۱۸۰ ویکرز افزایش یافت و پارامترهای عملیاتی مانند دمای پریفرم و قالب، گرم شدن بیش از حد مذاب و فشار

وارد شده باید به طور مناسب برای یک سیستم انتخاب شوند تا فصل مشترک مناسبی بین زمینه و تقویت کننده حاصل شود.

حجاری و همکاران [14] به بررسی الیاف کربن با روکش نیکل و همچنین تاثیر فشار در تولید کامپوزیت زمینه آلومینیومی با تقویت کننده الیاف پیوسته به روش نفوذ فشار گاز پرداختند. استفاده از الیاف کربن روکش شده با نیکل، فشار مورد نیاز برای تولید کامپوزیت را از ۵۰ MPa به ۳۰ MPa کاهش داد. این به دلیل بهبود قابلیت ترشوندگی الیاف کربن با آلومینیوم مذاب است.

دائود و همکاران [15] به بررسی خواص کششی کامپوزیت زمینه آلومینیومی تقویت شده با الیاف کربن پرداختند. در مقایسه با آلیاژ آلومینیوم، مدول کششی از ۷۳/۳ GPa به ۲۲۱ GPa و استحکام کششی نهایی از ۲۰٦ MPa به ۲۵۵۵ MPa افزایش یافت، اما میزان کرنش تا شکست قطعه از ۹ درصد به ۱/۲۵ درصد کاهش یافت.

ایوای و همکاران [16] به بررسی رفتار سایش خراشان کامپوزیت‌های آلومینیوم تقویت شده با الیاف آلومینا پرداختند. الیاف آلومینا مانع تغییرشکل پلاستیک و گسترش ترک‌های سایش شدند. میزان سایش با افزایش درصد حجمی آلومینا حدود ۳۰ درصد کاهش یافت.

آرسنائولت و همکاران [17] به بررسی تقویت آلیاژ آلومینیوم با الیاف و صفحات کاربید سیلیکون پرداختند. الیاف کامپوزیتی استحکام کششی بالاتری نسبت به صفحات کامپوزیتی داشت. این افزایش مقاومت به دلیل چگالی نابجایی بالاتر و اندازه ریزدانه‌های کوچک در زمینه نسبت به آلیاژ آلومینیوم بود.

با توجه به مطالب تحقیقات صورت گرفته، مهم‌ترین چالش‌های ساخت لوله‌های کامپوزیتی زمینه آلومینیومی تقویت شده با الیاف سرامیکی پیوسته، ترشوندگی الیاف با مذاب و رخنه دهی مذاب به داخل رشته‌های الیاف در حین فرایند ریخته گری کوبشی است. در مقاله حاضر، پوشش الیاف و تأثیر درصد وزنی الیاف بر ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت تولیدی به روش ریخته‌گری کوبشی بررسی شد.

بخش تجربی

مواد. در تحقیق حاضر از آلیاژ A۳۵٦ به‌عنوان زمینه‌ی آلومینیومی کامپوزیت استفاده شد. تقویت‌کننده‌های مورد استفاده، الیاف کربن با نام تجاری T۳۰۰ و الیاف شیشه E-glass بود که هر دسته الیاف به‌طور تقریبی شامل ۳۰۰۰ رشته، ضخامت دسته الیاف بافته‌شده حدود ۰/۵ میلی‌متر و هر رشته دارای قطر متوسط ۸–۷ میکرون بود. در جدول (۱) خواص الیاف مورد استفاده نشان داده شده است. همچنین کد نمونه‌های ساخته شده نیز در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۱ خواص الیاف‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر

خواص	الیاف	
	کربن T۳۰۰	شیشه E-glass
استحکام کششی (GPa)	۳/۵	۲
مدول الاستیک (GPa)	۲۳۰	۷٦
افزایش طول (٪)	۱/۵	٤/۷
دانسیته (gr/cm^3)	۱/۷٦	۲/٥٤
استحکام کششی (GPa)	۳/۵	۲

جدول ۲ کد نمونه‌های ساخته شده در تحقیق حاضر.

نمونه	کد نمونه
آلومینیوم	Al
آلومینیوم با ۳۰ درصد وزنی کربن	C30
آلومینیوم با ۳۰ درصد وزنی شیشه	G30
آلومینیوم با ٤۰ درصد وزنی شیشه	G40
آلومینیوم با ۵۰ درصد وزنی شیشه	G50
آلومینیوم با ٦۰ درصد وزنی شیشه	G60

ساخت کامپوزیت‌ها. به علت واکنش‌پذیری بالای عنصر کربن موجود در الیاف کربن و آلومینیوم در دمای بالا و تشکیل کاربید آلومینیوم با ترکیب Al_4C_3 که این مسئله منجر به تجزیه الیاف کربن و افت خواص کامپوزیت می‌گردد [18]. به‌منظور جلوگیری از انجام واکنش‌های مضر و همچنین رفع ضعف ترشوندگی بین الیاف کربن و زمینه، پوشش نیکل– فسفر روی الیاف کربن به روش الکترولس اعمال شد. برای ذوب کردن آلیاژ و انجام عملیات کامپوزیت‌سازی از دو کوره مقاومتی استفاده گردید. در یکی از این کوره‌ها شمش آلومینیومی، ذوب و در دیگری عمل پیش‌گرم کردن قالب انجام شد. بعد از مرحله پوشش دهی الیاف کربن و عملیات حرارتی، لوله آلومینیومی به قطر ٤ cm تهیه شد.

سپس با توجه به درصد تقویت‌کننده نهایی در کامپوزیت، الیاف به دور لوله پیچیده و درون قالب قرار داده شد. پس از آماده‌سازی شرایط، فرایند ریخته‌گری آغاز شد. به‌منظور جلوگیری از جوش سرد قطعه به قالب و همچنین کنترل دمای قالب به‌عنوان یکی از پارامترهای ثابت فرایند، قبل از ریخته‌گری هر نمونه، عملیات پیش‌گرم قالب، سنبه و الیاف در دمای صورت گرفت. آلومینیوم ذوب شده با فشار ٦٠٠ Mpa توسط سنبه به درون الیاف تزریق شد. با این روش، یک لوله آلیاژی A356، دو لوله کامپوزیتی تقویت شده با ۳۰ درصد وزنی الیاف کربن با پوشش نیکل – فسفر و بدون پوشش و چهار لوله کامپوزیتی تقویت شده با الیاف شیشه در درصد وزنی‌های ۳۰، ٤٠، ٥٠ و ٦٠ تولید شدند.

بررسی ریزساختار. ریزساختار کامپوزیت‌ها و مقطع شکست به‌وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) Field Emission Scanning Electron Microscopy) مدل TESCAN MIRA3 مجهز به طیف‌سنج EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) بررسی شد.

آزمون های فیزیکی و مکانیکی. چگالی نمونه ها، به روش ار شمیدس و چگالی سنج Bel Engineering مدل AC002 طبق استاندارد ASTM B962 اندازه‌گیری شد.

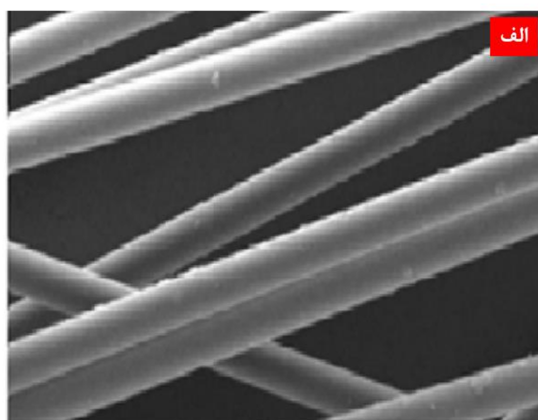
به‌منظور بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های تهیه شده، آزمون خمش سه‌نقطه‌ای تحت استاندارد ASTM D790 انجام شد. در این آزمون ، نمونه‌های خمش دارای ضخامت ٤ میلی‌متر و عرض ٦ میلی‌متر و سرعت حرکت فک ۱ mm/min و طول تکیه گاه ۲۳ میلی‌متر بود. آزمون حلقه نول تحت استاندارد ASTM D2290 انجام شد. در این آزمون، نمونه‌ها به صورت حلقه‌ای با عرض ۱۳ میلی‌متر است. سرعت حرکت فک ۳ mm/min بود. برای سنجش سختی نمونه‌ها نیز از سختی‌سنجی برینل استفاده شد.

آزمون‌های مکانیکی برای هر گروه از نمونه‌ها سه بار انجام و میانگین آن گزارش شد.

نتایج و بحث

بررسی ریزساختار نمونه‌ها. شکل (۱) تصاویر SEM از الیاف کربن قبل و بعد از پوشش نیکل و فسفری را نشان می‌دهد.

شکل (۱–الف) الیاف بدون هیچ‌گونه پوشش را نشان می‌دهد که به دنبال آن تماس مذاب با الیاف ایجاد فاز مخرب در فصل مشترک را به دنبال دارد. طبق شکل (۱–ب) سطح الیاف به‌طور کامل توسط عناصر نیکل و فسفر پوشیده شده و ساختار پوشش به‌صورت جزیره‌ای است که این جز خواص فرآیند الکترولس نیکل– فسفر هست. حضور پوشش نیکل– فسفر بر روی سطح الیاف کربن، مانع از تماس مستقیم مذاب آلومینیوم با سطح الیاف کربن می‌شود و درنتیجه واکنشی بین آلومینیوم و الیاف کربن (Al_4C_3) رخ نخواهد داد. حضور این فاز مخرب در فصل مشترک الیاف کربن و زمینه آلومینیومی موجب ضعیف شدن فصل مشترک شده و افت خواص مکانیکی را همراه خواهد داشت.

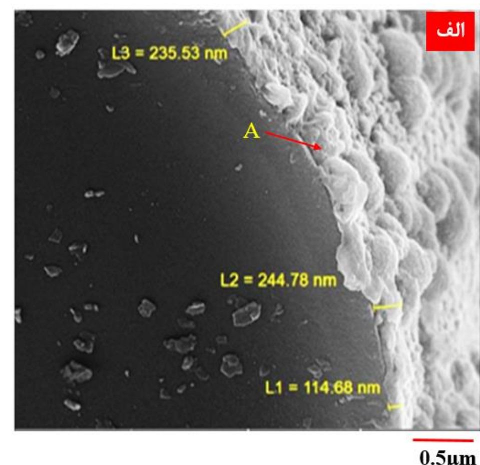


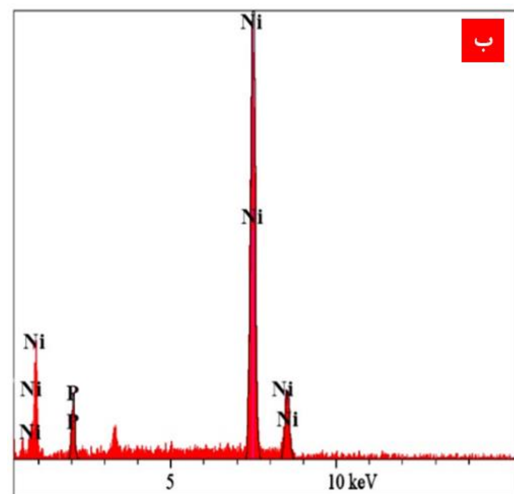


شکل ۱ تصاویر FESEM از سطح الیاف کربن الف) بدون پوشش و ب) دارای پوشش نیکل – فسفر

شکل (۲) تصویر SEM و آنالیز طیف‌سنجی توزیع انرژی (EDS) از پو شش نیکل – ف سفر الیاف کربن را ن شان می‌دهد. آنالیز EDS حضور عناصر Ni و P در سطح الیاف را تایید

می‌کند. در حین پوشش‌دهی، در ابتدا فلز نیکل بر روی مکان‌هایی از سطح الیاف که دارای انرژی سطحی بالاتری می‌باشند، تا ضخامت حدودµm ۰/۲ به‌صورت پراکنده رسوب‌کرده و سپس با ادامه رسوب‌گذاری، فلز نیکل در تمامی سطح الیاف گسترش می‌یابد، به‌طوری‌که اگر ضخامت پو شش نیکل به حدود µm ۰/۵ افزایش پیدا کند، پوشش به‌صورت تقریباً یکنواخت و پیوسته در سطح الیاف تشکیل می‌گردد. با ادامه رسوب‌گذاری و در ضخامت‌های بالاتر از µm ۰/۸، رشد پوشش نیکل به‌صورت موضعی روی سطح الیافی که قبلاً مورد پوشش‌دهی قرارگرفته‌اند، ادامه می یابد و مجدداً باعث غیریکنواختی در پوشش تشکیل‌شده بر روی سطح الیاف می‌گردد [14].



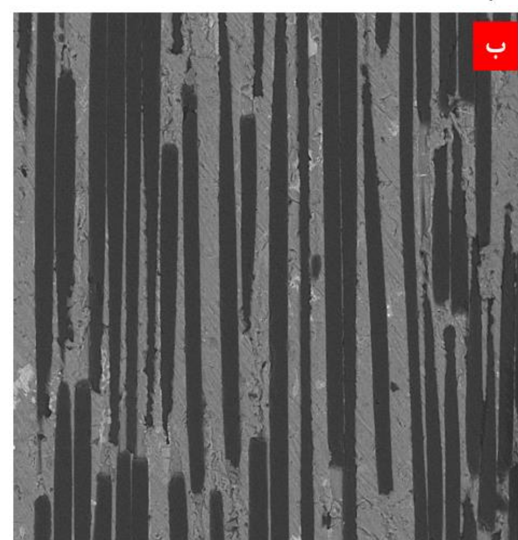


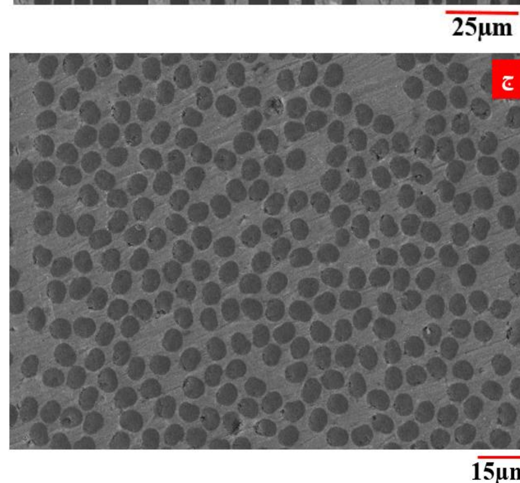
شکل ۲ الف) تصویر FESEM از فصل مشترک الیاف کربن و پوشش نیکل–فسفر و ب) EDS حاصل از نقطه A در شکل الف.

شکل (۳) ریزساختار لوله‌ی کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف کربن فاقد پوشش و حاوی پوشش نیکل–فسفر را نشان می‌دهد. در نمونه حاوی الیاف فاقد پوشش (شکل ۳–الف) علی‌رغم فشار حین فرایند ریخته‌گری، مذاب آلومینیوم به دلیل عدم پوشش الیاف کربن و درنتیجه مناسب نبودن زاویه ترشوندگی مذاب آلومینیوم با الیاف کربن، درون الیاف کربن نفوذ نکرده است و فقط سطح الیاف کربن را در برمی‌گیرد. عدم نفوذ مذاب به درون دسته‌های الیاف کربن فاقد پوشش را می‌توان به کافی نبودن زمان تماس بین الیاف و مذاب نسبت داد. با توجه به اینکه خاصیت ترشوندگی تابعی از زمان تماس بین دو ماده بوده و زاویه ترشوندگی باگذشت زمان تغییر می‌کند لذا به نظر می‌رسد که زمان انجماد مذاب آلومینیوم کمتر از زمان مورد نیاز جهت کاهش زاویه ترشوندگی و تسهیل نفوذ مذاب به فضای بین دسته‌های الیاف کربن بوده است و همین مسئله موجب عدم ورود مذاب به درون الیاف کربن و مانع انجام عمل فلزخورانی می‌گردد. شکل (۳– ب و ج) به ترتیب ریزساختار لوله‌ی کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف کربن دارای پوشش نیکل–فسفر، در مقطع طولی و سطح مقطع را نشان می‌دهد. مذاب آلومینیوم در اثر اعمال فشار حین فرایند ریخته‌گری، به‌طور کامل در بین الیاف کربن نفوذ کرده است. علت نفوذ مناسب آلومینیوم در بین الیاف ناشی از پوشش اعمال‌شده روی الیاف کربن است، زیرا با اعمال پوشش، زاویه ترشوندگی بین الیاف و مذاب آلومینیوم کم شده (به سمت ۰ درجه میل می‌کند) و درنتیجه مذاب آسان‌تر در بین الیاف نفوذ می‌کند. علاوه بر این، پوشش دهی باعث چسبندگی بهتر مذاب با الیاف کربن می‌شود [4].

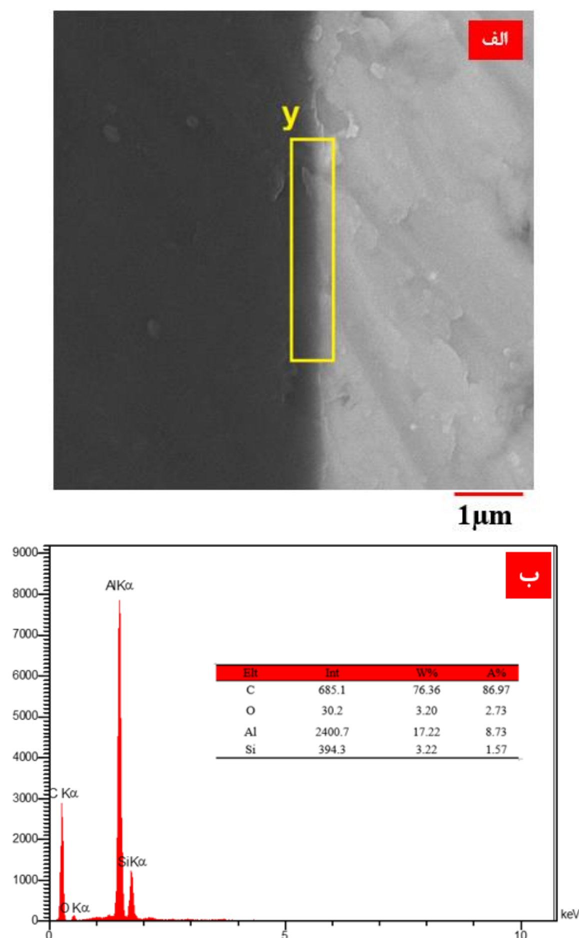
به‌منظور بررسی وجود یا عدم وجود فاز Al_4C_3 در فصل مشترک الیاف کربن پوشش داده شده و زمینه (با توجه به واکنش احتمالی Al و C)، از تحلیل EDS کمک گرفته شد (شکل ٤). با توجه به نتایج EDS، اثری از تشکیل فاز کاربیدی در فصل مشترک الیاف کربن و زمینه آلومینیومی (فصل مشترک y) و همچنین پوشش نیکل – فسفر بر روی الیاف کربن مشاهده نشد.







شکل ۳ تصاویر SEM از کامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت‌شده با ۳۰ درصد وزنی الیاف کربن الف) بدون پوشش نیکل–فسفر، ب) با پوشش نیکل–فسفر در مقطع طولی و ج) با پوشش نیکل–فسفر در مقطع عرضی.



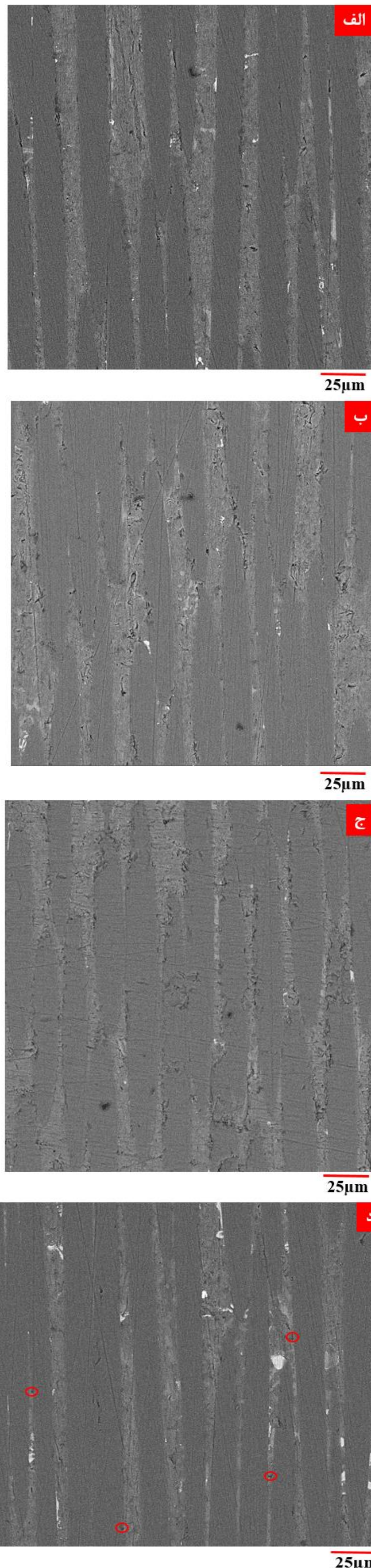
Elt	Int	W%	A%
C	685.1	76.36	86.97
O	30.2	3.20	2.73
Al	2400.7	17.22	8.73
Si	394.3	3.22	1.57

شکل ٤ الف) تصویر SEM از کامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت‌شده با ۳۰ درصد وزنی الیاف کربن با پوشش نیکل–فسفر و ب) EDS حاصل از منطقه y در شکل الف.

شکل (۵) ریزساختار نمونه‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف شیشه در مقطع طولی با درصد وزنی‌های ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ٦۰ درصد هستند. توزیع الیاف، کسر حجمی بالای تقویت‌کننده و نفوذ موفق مشهود است. در مناطقی در درصد وزنی‌های کمتر، تخلخل‌ها را به دلیل ناتوانی مذاب آلومینیوم در نفوذ به درون الیاف می‌توان یافت، اما با افزایش درصد وزنی الیاف، تخلخل‌ها نیز به دلیل تراکم الیاف و سخت‌تر شدن نفوذ مذاب آلومینیوم، افزایش پیدا می‌کند (دایره‌های قرمز در شکل (۵–د). به علت سرعت زیاد حین ذوب‌ریزی درون قالب، درصدی از هوای موجود درون قالب و بین رشته‌های الیاف فرصت خروج از قالب را پیدا نکرده و به همین سبب این گاز درون مذاب محبوس می‌شود. گاز موجود در سطح الیاف تقویت‌کننده و همچنین

جوانه‌زنی حباب‌های گاز بر روی سطح مستعد و زیاد این الیاف می‌تواند از عوامل افزایش حفرات گازی و لذا افزایش میزان تخلخل نسبت به درصد الیاف کمتر باشد. گازهایی که جذب سطح تقویت‌کننده می‌شوند به‌راحتی از بین نمی‌روند؛ بنابراین الیاف کربن و شیشه داخل مذاب، محل‌های مناسبی جهت جوانه-زنی حباب‌های گازی می‌باشند از طرفی به دلیل مساحت زیاد این الیاف شرایط مذکور تشدید می‌شود. اعمال فشار باعث بهبود نفوذ مذاب به قسمت‌هایی از قطعه که در حال انجماد هست، خواهد شد. همچنین اعمال فشار سبب افزایش میزان انحلال گازها در مذاب می‌شود، یعنی گازهایی که امکان داشت در حین سرد شدن و کاهش حد انحلال گاز در مذاب، تبدیل به عیوب گازی شوند، با اعمال فشار، بر روی جوانه‌زنی حفرات نیز تأثیر می‌گذارد و حفرات را حذف و یا کوچک می‌کند [19].

بررسی خواص فیزیکی نمونه‌ها. چگالی لوله‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف کربن و شیشه با درصد الیاف مختلف در جدول (۲) نشان داده شده است. چگالی تئوری طبق قانون مخلوط‌ها به دست آمد. تخلخل لوله‌ی کامپوزیتی تقویت‌شده با ۳۰ درصد وزنی الیاف کربن ۲/۱۵ درصد و درصد تخلخل لوله‌ی کامپوزیتی تقویت‌شده با ۳۰ درصد وزنی الیاف شیشه ۱/۸۹ درصد بدست آمد. در لوله‌ی با الیاف کربن با وجود پوشش‌دهی الیاف، میزان ترشوندگی الیاف کربن با مذاب آلومینیومی کم‌تر از ترشوندگی الیاف شیشه با مذاب آلومینیوم بود که نشان می‌دهد مذاب آلومینیوم در نمونه‌ی کامپوزیتی با الیاف کربن نتوانست به میزان لوله‌ی کامپوزیتی با الیاف شیشه، فضاهای بین الیاف را پر کند و درصد تخلخل بالاتری دارد. در لوله‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف شیشه تا ٤٠ درصد وزنی الیاف، مذاب آلومینیوم به خوبی بین الیاف شیشه نفوذ کرده و توانست فضاهای بین الیاف را تا حد ممکن پر کند اما با افزایش درصد وزنی الیاف شیشه، به دلیل تراکم و فشردگی زیاد الیاف، مذاب به‌خوبی نفوذ و فضاهای بین الیاف را پر نکرده و همین امر درصد تخلخل را تا ٦/٩٣ درصد افزایش داد.



شکل ٥ تصاویر SEM کامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت‌شده با الیاف شیشه با الف) ۳۰، ب) ٤٠، ج) ٥٠ و د) ٦٠ درصد وزنی.

جدول ۲ چگالی حاصل از نمونه‌های کامپوزیتی.

کد نمونه	چگالی			درصد
	تئوری	تجربی	نسبی	تخلخل
Al	۲/٦۷	۲/٦٥	۹۹/۲٥	۰/۷٥
C30	۲/۳۳	۲/۲۸	۹۷/۸٥	۲/۱٥
G30	۲/٦٥	۲/٦	۹۸/۱۱	۱/۸۹
G40	۲/٦٤	۲/٦	۹۸/٤۸	۱/٥۲
G50	۲/٦۲	۲/٥٤	۹٦/۹٤	۳/۰٦
G60	۲/٦۰	۲/٤۲	۹۳/۰۷	٦/۹۳

بررسی خواص مکانیکی نمونه‌ها. سختی لوله‌های ریخته‌گری شده بر حسب برینل اندازه‌گیری شد (جدول ۳). در لوله‌های کامپوزیتی ریخته‌گری شده با ۳۰ درصد وزنی الیاف، سختی لوله دارای الیاف کربن ۸۳ برینل و لوله دارای الیاف شیشه ۷۱ برینل است که علت آن استحکام بالای الیاف کربن در مقایسه الیاف شیشه است. در لوله‌های دارای الیاف شیشه، با افزایش درصد وزنی الیاف تا ۵۰ درصد، سختی نمونه‌ها از ۷۱ تا ۱۳۵ برینل افزایش پیدا کرده و سپس در نمونه‌های دارای ٦۰ درصد وزنی الیاف شیشه، به دلیل فشردگی و تراکم الیاف و افزایش تخلخل‌ها در ساختار (جدول ۲)، سختی لوله ریخته‌گری به ۱۰۵ برینل کاهش پیدا کرد.

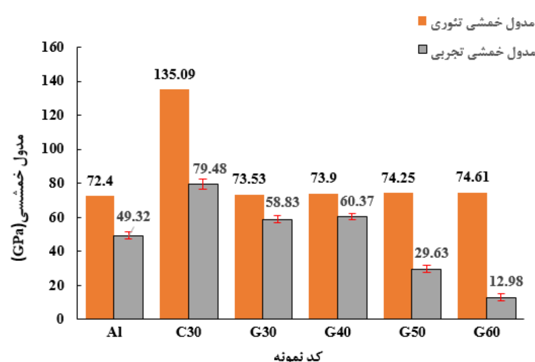
جدول ۳ نتایج حاصل از آزمون سختی.

نمونه	سختی (BHN)
Al	٦۸
C30	۸۳
G30	۷۱
G40	۱۱٦
G50	۱۳٥
G60	۱۰٥

مدول خمشی یک ماده، خاصیتی است که سفتی یا مقاومت یک ماده در ناحیه الاستیک را در برابر خمش اندازه‌گیری می‌کند. انتظار می‌رود سفتی لوله‌ی کامپوزیتی دارای الیاف کربن بیشتر از لوله‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه باشد که به علت مدول بالای الیاف کربن T300 (۲۳۰ گیگاپاسکال) نسبت به مدول الیاف شیشه E glass (۷٦ گیگاپاسکال) است. از طرفی با افزایش درصد الیاف شیشه به دلیل بیشتر شدن حجم الیاف، سفتی لوله‌ها افزایش یافته و در آزمون خمشی باعث سخت‌تر خم شدن نمونه‌های خمش می‌شود. با استفاده از معادله قانون مخلوط‌ها (رابطه ۱)، مدول خمشی تئوری لوله‌های کامپوزیتی محاسبه می‌شود که در آن E_m مدول خمشی زمینه آلومینیومی، E_f مدول خمشی الیاف، X_m کسر حجمی زمینه آلومینیومی، X_f کسر حجمی الیاف است [20].

$$E_c = (E_m \times X_m) + (E_f \times X_f) \quad (1)$$

شکل (٦) نتایج مدول خمشی تئوری و تجربی را نشان می‌دهد. مطابق انتظار مدول خمشی لوله‌ی کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف کربن بیشتر از بقیه نمونه‌ها بود. با افزایش درصد وزنی در لوله‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف شیشه، مدول خمشی تجربی به شدت کاهش می‌یابد به‌طوری که در لوله‌ی کامپوزیتی تقویت‌شده با ٦۰ درصد وزنی الیاف شیشه، مدول خمشی به حدود یک چهارم مدول خمشی لوله آلیاژی A۳٥٦ می‌رسد.



شکل ٦ مدول خمشی تئوری و تجربی کامپوزیت‌های ساخته شده

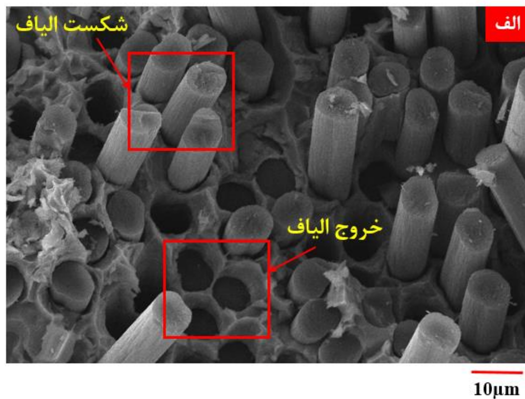
نتایج استحکام خمشی لوله‌های ریخته‌گری شده در جدول (٤) نشان داده شده است که طبق آن لوله‌ی کامپوزیتی تقویت‌شده با ۳۰ درصد وزنی الیاف کربن ۲٥۷/۸۲ مگاپاسکال و برای لوله‌ی کامپوزیتی تقویت‌شده با ۳۰ درصد وزنی الیاف شیشه ۳۳٤/٤۷ مگاپاسکال بود. علت این امر، ترشوندگی بهتر الیاف شیشه، استحکام چسبندگی مستحکم‌تر و درنتیجه فصل مشترک قوی بین الیاف شیشه و زمینه آلومینیومی و فصل مشترک ضعیف بین الیاف کربن و زمینه آلومینیومی است. در لوله‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف شیشه، با افزایش الیاف تا ٤۰ درصد وزنی استحکام خمشی تا ۳٤۰/۸۲ مگاپاسکال افزایش می‌یابد که نسبت به نمونه آلیاژی A۳٥٦ با استحکام خمشی ۱۹۳/۳٦ مگاپاسکال حدود ۷٦ درصد افزایش یافته است. سپس با افزایش درصد وزنی الیاف، به

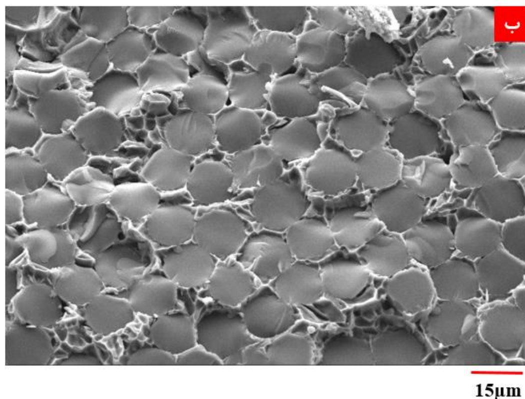
دلیل تراکم الیاف، عدم فضا برای نفوذ مذاب آلومینیوم، تشکیل حفرات، تخلخل‌ها و همچنین عدم پیوستگی زمینه آلومینیومی، استحکام خمشی کاهش ، به طوری که استحکام خمشی می‌یابد. به طوری‌که لوله‌ی کامپوزیتی تقویت‌شده با ٦٠ درصد وزنی الیاف شیشه به ٧٩/٣١ مگاپاسکال می‌رسد.

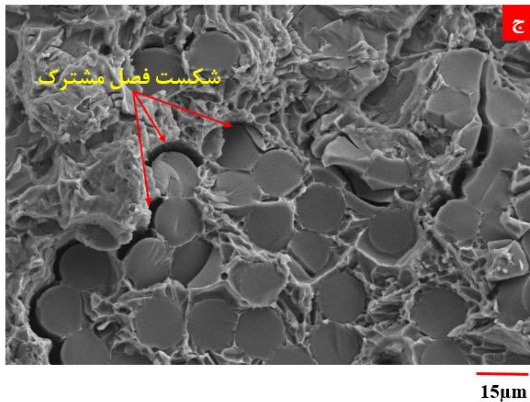
جدول ٤ استحکام خمشی حاصل از آزمون خمشی.

نمونه	سختی (BHN)
Al	١٩٣/٣٦
C30	٢٥٧/٨٢
G30	٣٣٤/٤٧
G40	٣٤٠/٨٢
G50	١٧١/٨٥
G60	٧٩/٣١

بررسی تصاویر SEM حاصل از سطح شکست نمونه‌ها پس از آزمون خمش، دو مکانیزم برش الیاف و خروج الیاف از زمینه در سطوح شکست را نشان داد. به هر میزان ترشوندگی الیاف توسط زمینه (مذاب آلومینیومی) بهتر صورت گرفته باشد، پیوند بین الیاف و زمینه قوی‌تر بوده و نیروی وارده به زمینه از طریق این پیوند مناسب در فصل مشترک به الیاف منتقل‌شده و استحکام بیشتر در حین آزمون را باعث می‌شود [21]. سطح شکست نمونه‌های در شکل (٧) نشان داده شده است. در این نمونه‌ی کامپوزیتی حاوی ٣٠ درصد وزنی الیاف بازالت، الیافی که به‌خوبی پوشش نیکل – فسفر روی آن‌ها قرارگرفته است، فصل مشترک قوی‌تری با زمینه آلومینیومی دارند و به همین دلیل در این الیاف، شکست از نوع برشی بوده است اما الیافی که پوشش نیکل – فسفر مناسب و یکنواخت بر روی آن‌ها قرار نگرفته است، فصل مشترک ضعیف‌تری با زمینه آلومینیومی دارند و به همین دلیل مکانیزم شکست این نوع الیاف، خروج الیاف است (شکل ٧– الف). در نمونه ٣٠ و ٤٠ درصد وزنی مذاب آلومینیوم توانسته بین الیاف شیشه موجود به‌صورت کامل نفوذ کند، به‌عبارت‌دیگر آغشته شدن الیاف توسط زمینه بهتر صورت گرفته و پیوند بین الیاف شیشه و زمینه آلومینیومی قوی‌تر بوده و نیروی وارده به کامپوزیت به الیاف منتقل‌شده و استحکام بیشتری به دست آمده است، با افزایش درصد وزنی الیاف، نفوذ مذاب آلومینیومی به درون الیاف کمتر بوده است و علت این امر افزایش تراکم الیاف و نبود فضای کافی برای نفوذ مذاب هست. همچنین، به دلیل همین مسئله، در درصد وزنی‌های بالاتر تخلخل بیشتر و فضاهای خالی بیشتری در اطراف الیاف مشاهده می‌شود که موجب افت خواص مکانیکی می‌شود. همچنین استحکام پایین الیاف شیشه E glass نیز سبب شکسته شدن الیاف به شکل برشی شده است [12,22].



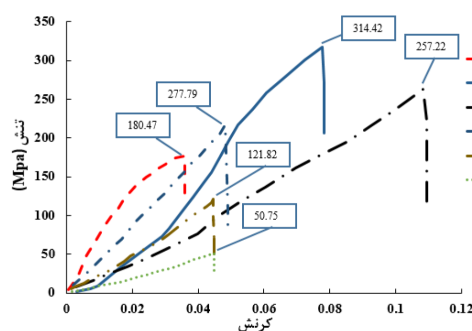




شکل ٧ تصاویر SEM از سطح شکست کامپوزیت الف) C30، ب) G40 و ج) G60

شکل (٨) نمودارهای تنش – کرنش پس از آزمون حلقه نول برای نمونه‌های تهیه شده را نشان می‌دهد. استحکام کششی لوله‌ی کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف کربن با ٣١٤/٤٦ مگاپاسکال دارای بیشترین استحکام کششی است. در لوله‌های کامپوزیتی تقویت-شده با الیاف شیشه، با افزایش درصد وزنی الیاف، استحکام کششی افت می‌کند به‌طوری که در لوله‌ی کامپوزیتی تقویت‌شده

با ٦٠ درصد وزنی الیاف شیشه، استحکام کششی به ٥٠/٧٥ مگاپاسکال می‌رسد.



شکل ٨ نمودار تنش- کرنش حاصل از آزمون حلقه نول برای کامپوزیت‌های ساخته شده

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت لوله-ای زمینه آلومینیوم تقویت شده با الیاف کربن و شیشه مورد مطالعه قرار گرفت.

نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:

١- با اعمال پوشش نیکل - فسفر روی الیاف کربن، ترشوندگی الیاف کربن توسط مذاب آلومینیوم بهبود یافته و باعث نفوذ مذاب آلومینیومی به درون الیاف کربن شد.

٢- با افزایش درصد وزنی الیاف شیشه، چگالی لوله‌های کامپوزیتی به دلیل افزایش تخلخل‌ها، از g/cm^3 ٢/٦ تا g/cm^3 ٢/٤٢ کاهش پیدا کرد.

٣- سختی لوله‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف شیشه، با افزایش درصد وزنی الیاف به ٦٠ درصد، ٢٨ درصد افت کرد و سختی به ١٠٥ برینل رسید.

٤- مدول خمشی لوله‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف کربن در درد وزنی یکسان بیشتر از الیاف شیشه بود. مدول خمشی لوله‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف شیشه، با افزایش درصد وزنی الیاف، دچار کاهش شدید شده و از ٦٠/٣٧ گیگاپاسکال به ١٢/٩٨ گیگاپاسکال رسید.

٥- با افزایش درصد وزنی الیاف شیشه لوله‌های کامپوزیتی، استحکام خمشی از ٣٤٠/٨٢ مگاپاسکال به ٧٩/٣١ مگاپاسکال کاهش پیدا کرد.

٦- استحکام کششی تحت آزمون حلقه نول، با افزایش درصد وزنی الیاف، به دلیل عدم نفوذ مناسب مذاب آلومینیومی از ٣١٤/٤٦ مگاپاسکال به ٥٠/٧٥ مگاپاسکال کاهش پیدا کرد.

٧- در لوله‌ی کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف کربن به دلیل فصل مشترک ضعیف بین الیاف کربن و زمینه آلومینیومی، شکست نمونه تحت آزمون خمش، با خروج الیاف همراه بود.

٨- در لوله‌ی کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف شیشه به دلیل فصل مشترک قوی بین الیاف شیشه و زمینه آلومینیومی و استحکام پایین الیاف شیشه E-glass، نمونه تحت آزمون خمش با برش الیاف دچار شکست شد.

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] Z. Libin, Z. and H. Jintao, “Metal matrix composites in China,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.75, No. 3, pp. 1-5, 1998.

[2] A. Alizadeh, M. Abdollahi Azghan, “Investigation on the microstructure and tensile properties of Al5083-TiB2 nanocomposites produced by stir casting method,” *Journal of Advanced Materials and Technologies*, Vol.10, No.2, pp. 45-57, 2021.

[3] A. Alizade, M. Abdollahi Azghan, H. Abedi, “Investigation of Microstructure and Mechanical Behavior of Al/SiC/CNT Surface Composite Fabricated by Friction Stir Processing,” *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 11, No. 6, pp. 219-233, 2022.

[4] S.W. Ip, R. Sridhar, J.M. Toguri, T.F. Stephenson, A.E.M. Warner, “Wettability of nickel coated graphite by aluminum,” *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 244, No.1, pp. 31-38, 1998.

[5] M. Abdollahi Azghan, F. Bahari-Sambran, R. Eslami-Farsani, “Modeling and experimental study on the mechanical behavior of glass/basalt fiber metal laminates after thermal cycling,” *International Journal of Damage Mechanics*, Vol. 30, No. 8, pp. 1192-1212, 2021.

[6] E. Hajjari, M. Divandari, A. Mirhabibi, “The study of electroless coating of nickel on carbon fibers,” *Iranian Journal of Materials Science & Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 3-48, 2004.

[7] M. Akbari, M. Ezzati, P. Asadi, “Investigation of the effect of tool probe profile on reinforced particles distribution using experimental and CEL approaches,” *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, Vol. 5, No. 2, pp. 213-223, 2022.

[8] T. Arunkumar, T. Selvakumaran, R. Subbiah, K. Ramachandran, S. Manickam, “Development of high-performance aluminium 6061/SiC nanocomposites by ultrasonic aided rheo-squeeze casting method,” *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 76, pp. 105-123, (2021).

[9] A. Kareem, J. Abu Qudeiri, A. Abdudeen, T. Ahammed, A. Ziout, “A review on AA 6061 metal matrix composites produced by stir casting,” *Materials*, vol. 14, No. 1, pp. 175, 2021.

[10] J. Deng, Z. Ye, L. Shan, D. You, G. Liu, “Imputation Method Based on Collaborative Filtering and Clustering for the Missing Data of the Squeeze Casting Process Parameters,” I*ntegrating Materials and Manufacturing Innovation*, vol. 11, No.1, pp. 95-108, 2022.

[11] A. Jahangiri, S. Marashi, M. Mohammadaliha, V. Ashofte, “The effect of pressure and pouring temperature on the porosity, microstructure, hardness and yield stress of AA2024 aluminum alloy during the squeeze casting process,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 245, pp. 1-6, 2017.

[12] I.N. Orbulov, I. Kientzl, J. Blücher, J. Ginsztler, A. Németh, “Production and investigation of a metal matrix composite pipe,” *14th European Conference on Composite Materials (ECCM-14)*, Hungary, 2010.

[13] S. Seshan, A. Gurupraad, M. Prabha, A. Sudhakar, “Fibre-reinforced metal matrix composites-a review,” *Journal of the Indian Institute of Science*, vol. 76, No.1, pp. 1-14, 1996.

[14] E. Hajjari, M. Divandari, H. Arabi, “Effect of applied pressure and nickel coating on microstructural development in continuous carbon fiber-reinforced aluminum composites fabricated by squeeze casting,” *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 26, No.4, pp. 599-603, 2011.

[15] A. Daoud, “Microstructure and tensile properties of 2014 Al alloy reinforced with continuous carbon fibers manufactured by gas pressure infiltration,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 391, No.1-2, pp. 114-120, 2005.

[16] Y. Iwai, T. Honda, T. Miyajima, Y. Iwasaki, M. KSurappa, J. FXu, “Dry sliding wear behavior of Al2O3 fiber reinforced aluminum composites,” *Composites science and technology*, vol. 60, No.9, pp. 1781-1789, 2000.

[17] R. Arsenault, “The strengthening of aluminum alloy 6061 by fiber and platelet silicon carbide,” *Materials Science and Engineering*, vol. 64, No.2, pp. 171-181, (1984).

[18] B. Ma, J. Wang, T. Lee, S. Dorris, J. Wen, U. Balachandran “Microstructural characterization of Al4C3 in aluminum–graphite composite prepared by electron-beam melting,” *Journal of Materials Science*, Vol. 53, No.14, pp. 10173-10180, 2018.

[19] P. Bindumadhavan, T.K. Chia, M. Chandrasekaran, H. Wah, L. Lam, O. Prabhakar, "Effect of particle-porosity clusters on tribological behavior of cast aluminum alloy A356-SiCp metal matrix composites," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 315, No.1-2, pp. 217-226, 2001.

[20] K. Arjun, S. de Barros, S. Budhe, "Theoretical determination of elastic and flexural modulus for inter-ply and intra-ply hybrid composite material," *Composite Structures*, Vol. 281, pp. 114-121, 2022.

[21] C. McCullough, H. Deve, T. Channel, "Mechanical response of continuous fiber-reinforced Al2O3-Al composites produced by pressure infiltration casting," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 189, No.1-2, pp. 147-154, 1994.

[22] M. Zasadzińska, P. Strzępek, A. Mamala, P. Noga, "Reinforcement of aluminium-matrix composites with glass fibre by metallurgical synthesis," *Materials*, Vol. 13, No. 23, pp. 41-54, 2020.